

文章编号:1007-9629(2023)11-1200-07

木质素/玻璃纤维复合改性沥青混凝土路用性能提升效果研究

谢明君^{1,2}, 温宇彤^{1,2}, 徐玲玲^{1,2}, 吴凯^{1,2}, 蒋正武^{1,2,*}

(1. 同济大学 先进土木工程材料教育部重点实验室, 上海 201804;

2. 同济大学 材料科学与工程学院, 上海 201804)

摘要: 基于纤维改性沥青混凝土路用性能强化提升需求, 提出了采用木质素纤维(CF)/玻璃纤维(GF)复合改性沥青混凝土路用性能的方法, 研究了复合纤维组成对沥青混凝土路用性能的影响机理. 结果表明: CF/GF 复合改性有效提升了沥青混凝土的高温稳定性, 并具有良好的水稳定性和低温性能; 当 CF/GF 以质量比 1:3 掺入时, 沥青混凝土动稳定度为单掺 CF 组的 2.2 倍; 试件低温破坏时, 最大弯拉应变提升 13.3%. 复合纤维具有吸附、加筋及阻滞裂纹的作用, 强化了沥青混凝土在温度变化、水损及应力作用下的稳定性, 从而提高了其路用耐久性能.

关键词: 沥青混凝土; 纤维复合改性; 高温性能; 低温性能; 水稳定性

中图分类号: TU528.041

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.1007-9629.2023.11.008

Composite Modification with Cellulose Fiber/Glass Fiber to Enhance the Pavement Performance of Asphalt Concrete

XIE Mingjun^{1,2}, WEN Yutong^{1,2}, XU Linglin^{1,2}, WU Kai^{1,2}, JIANG Zhengwu^{1,2,*}

(1. Key Laboratory of Advanced Civil Engineering Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Cellulose fiber(CF) and glass fiber(GF) have been selected for asphalt concrete reinforcement to cope with the drawbacks of insufficient enhancement in comprehensive properties. Furthermore, the mechanism of fiber composite modification was explored by determining the pavement performance of asphalt concrete with varying proportions of CF/GF. The results indicate that the composite modification process of CF/GF improves high-temperature property, low-temperature performance and water stability of asphalt concrete effectively. As the mass ratio of CF/GF is 1:3 in asphalt concrete, the dynamic stability is 2.2 times that of the CF modified asphalt concrete. The maximum flexural-tensile strain is 13.3% higher than that of the CF modified asphalt concrete when the specimens are subjected to low-temperature damage. This enhancement can be attributed to the functional aspects which is originated from the adsorption, reinforcement, and crack retarding of composite fibers in the matrix of asphalt concrete, thus the durability is improved under the coupling effects of temperature changes, moisture damage, and stress loading.

Key words: asphalt concrete; fiber composite modification; high-temperature performance; low-temperature performance; moisture stability

收稿日期: 2023-03-17; 修订日期: 2023-05-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U22B2076, 51878480, 52078369); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目; 2021 年产业技术基础公共服务平台项目(2021-H029-1-1); 上海市优秀学术带头人计划(22XD1403300); “十四五”国家重点研发计划项目(2022YFC3803104); 国家留学基金委资助项目(202206260066)

第一作者: 谢明君(1996—), 男, 黑龙江七台河人, 同济大学博士生. E-mail: mjxie@tongji.edu.cn

通讯作者: 蒋正武(1974—), 男, 安徽潜山人, 同济大学教授, 博士生导师, 博士. E-mail: jzhw@tongji.edu.cn

新时代《交通强国建设纲要》提出,建设长寿命、高耐久、可持续的创新型路面已成为中国道路工程领域发展的必然趋势^[1-2],开展性能优异、耐久性良好的沥青路面材料研究更是其中的关键环节^[3-4].研究表明,纤维可有效提高沥青混凝土的力学性能和路用性能,并改善其水稳定性、抗疲劳特性及抗塑性变形能力^[5].在常用于沥青混凝土改性的纤维材料中,聚酯纤维具有极佳的力学性能,可改善混合料高温抗车辙能力和抗疲劳性能^[6-7],但成本较高、应用受限;木质素纤维可有效提升沥青混凝土低温抗裂性能,然而受限于自身特性,木质素纤维对沥青混凝土高温性能及水稳定性的提升效果有限^[8];玻璃纤维具有良好的化学稳定性和热稳定性,可提高沥青混凝土的抗变形能力,尤其在提升混合料高温稳定性方面具有重要作用,并可节省路面维护成本^[5,9-10];玄武岩纤维在提升沥青混凝土抗车辙能力及水稳定性方面能发挥重要作用^[11-12],但由于原料波动大、成本高、效率低,限制了其广泛应用.

综上,单一纤维改性往往难以兼顾沥青混凝土综合性能的提升,而复合改性可利用不同材料特性并克服单一使用的局限性^[8].已有研究证实:玻璃纤维/硫酸钙晶须复合改性沥青混凝土具有更好的抗裂性能^[13];木质素纤维、聚酯纤维及玄武岩纤维复掺显著提高了SBS改性沥青混凝土高温抗车辙能力^[14];玄武岩纤维/硅藻土复合改性大幅提高了沥青混凝土疲劳寿命和抗拉强度,其低温性能也得到有效改善^[15].

本研究针对沥青混凝土整体性能提升需求,采用高比表面积的木质素纤维与力学性能、耐水性能优异的玻璃纤维相结合,以期改善木质素纤维改性沥青混合料在高温抗车辙性能及抗水损害方面的不足,并增强其综合路用性能,降低应用成本;通过高温车辙试验、浸水马歇尔试验、冻融劈裂试验、低温弯曲试验等,对沥青混凝土的力学性能及路用耐久性改善效果进行综合评价,进一步探究了纤维复合改性影响机制及性能提升规律.

1 试验

1.1 原材料

试验所用基质沥青为中国石化上海石油化工

股份有限公司70号A级沥青,物理性能见表1;混合料集料级配类型为AC-13型,如表2所示,沥青用量¹⁾为4.9%.木质素纤维(CF)与玻璃纤维(GF)均产自常州筑威建筑材料有限公司,CF平均长度为0.8 mm;GF平均长度为12 mm,平均直径为10 μm .CF与GF的推荐掺量分别为沥青混合料质量的0.2%~0.4%和0.2%~0.6%^[8];此外,根据JTG F40—2004《公路沥青路面施工技术规范》,木质素纤维用量通常不低于0.3%.综上,本试验固定纤维总掺量为沥青混合料质量的0.4%,探讨不同复掺比例对其路用性能的影响,并节约应用成本.其中不同纤维改性沥青混凝土试件编号及所对应CF/GF质量比如表3所示.

表1 基质沥青的物理性能
Table 1 Physical properties of base asphalt

Grade	Penetration (25 °C)/(0.1 mm)	Softening point/°C	Ductility(10 °C)/ cm
70A	74	47.0	34

1.2 试验方法

根据JTG E20—2011《公路工程沥青及沥青混合料试验规程》中规定的试验方法,对纤维改性沥青混凝土试件的路用性能进行测试.通过马歇尔稳定度试验(T 0709—2011)测定沥青混合料体积参数,确定空隙率VV、矿料间隙率VMA及有效沥青饱和度VFA.采用车辙试验(T 0719—2011)测定沥青混合料动稳定度(DS),表征纤维复合改性试件高温抗车辙能力.利用浸水马歇尔试验计算试件马歇尔稳定度及残留稳定度,评价纤维复合改性对沥青混凝土水稳定性的影响.采用冻融劈裂试验(T 0729—2000)探究沥青混合料的水稳定性,并以冻融劈裂抗拉强度比TSR作为评价其抗水损害性能的指标.通过沥青混合料弯曲试验(T 0715—2011),测定-10 °C下试件破坏时的弯拉强度及最大弯拉应变,以评价纤维改性沥青混凝土的低温性能.

2 结果与讨论

2.1 马歇尔体积参数

CF/GF复合改性沥青混凝土的马歇尔体积参

表2 AC-13型沥青混合料级配
Table 2 Gradation of AC-13 asphalt mixture

Sieve size/mm	16.0	13.2	9.5	4.75	2.36	1.18	0.6	0.3	0.15	0.075
Passing ratio(by mass)/%	100.0	95.2	79.9	48.3	35.3	22.1	12.3	8.0	6.2	4.1

1)文中涉及的用量、比值等除特别说明外均为质量分数或质量比.

表3 不同纤维改性沥青混凝土试件及CF和GF复掺比例
Table 3 Proportions of CF and GF in specimens of fiber-modified asphalt concrete

Specimen	$w(\text{CF})/\%$	$w(\text{GF})/\%$
CF4	0.4	0
C3G1	0.3	0.1
C2G2	0.2	0.2
C1G3	0.1	0.3
GF4	0	0.4

数结果如图1所示.由图1(a)可见,纤维掺入过程中,低密度的纤维随机填充在混合料的空隙,从而导致与理论最大相对密度相比,毛体积相对密度有所下降^[16].由图1(b)可见:纤维掺入对试件空隙率影响较小,单一纤维及纤维复合改性试件的空隙率均小于5%,表明其具备较好的耐久性;随CF掺量降低与GF掺量提高,沥青混凝土空隙率VV有所增加,这是

因为丝状的玻璃纤维在拌和过程中容易团聚,导致混合料空隙率增大.由图1(c)可知,与单一纤维改性相比,纤维复合改性混合料矿料间隙率VMA略有增大.由于不同特性的纤维彼此桥接,在沥青混凝土基体中构建起更为致密的网状结构,强化了吸附作用并提高集料间容载沥青的含量,提高了“结构沥青”的比例,保证沥青混凝土的稳定性及路用性能.

有效沥青饱和度VFA可直观表示有效沥青占混合料的矿料间隙的体积分数.由图1(d)可知,无论是单一纤维改性还是复合改性,沥青混凝土的有效沥青饱和度均在65%以上.CF/GF混掺后,沥青混凝土的有效沥青饱和度VFA略有下降,这是由于复合纤维的吸附作用增大了沥青薄膜有效厚度和结构沥青比例,获得更为致密和均匀的沥青混凝土结构,增大了沥青混凝土压实程度,从而提高了混合料基体的稳定性与路用性能.

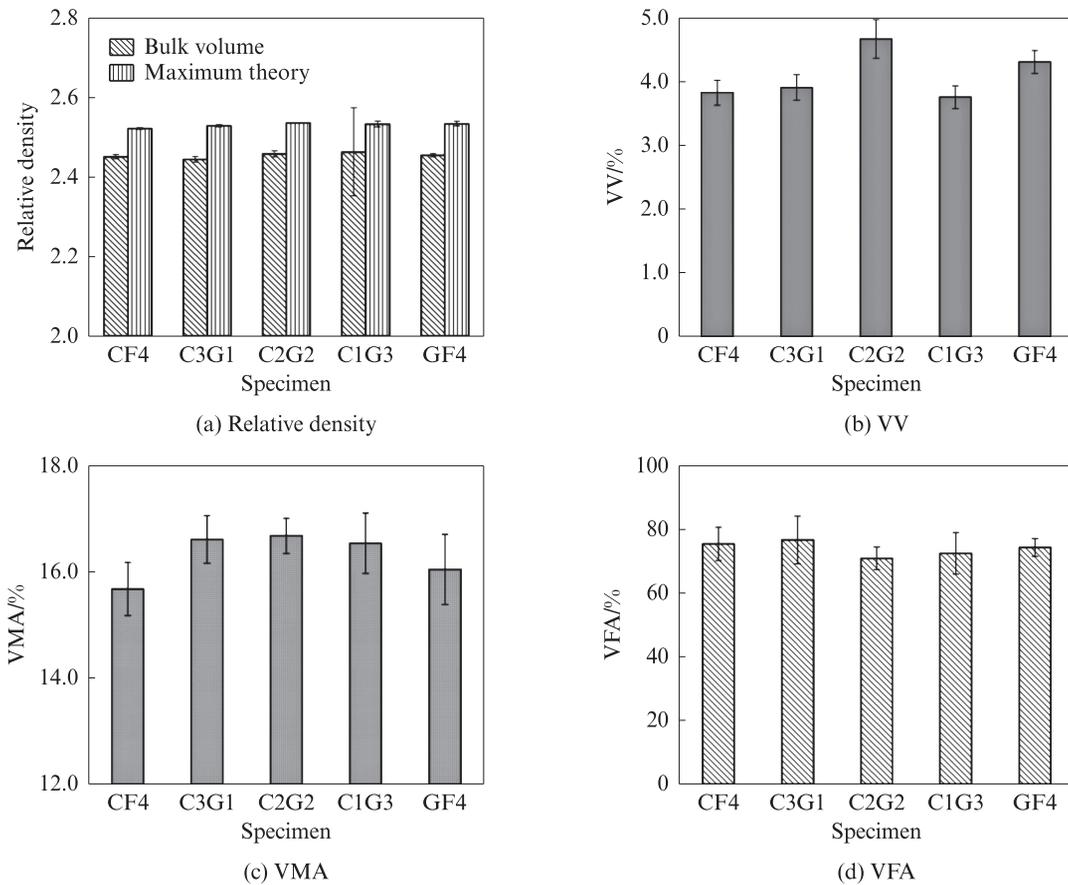


图1 CF/GF复合改性沥青混凝土的马歇尔体积参数
Fig. 1 Marshall volume parameters of CF/GF composite modified asphalt concretes

2.2 高温性能

CF/GF复合改性沥青混凝土高温车辙试验动稳定度DS结果如图2所示.由图2可见:与木质素纤维改性相比,玻璃纤维改性沥青混凝土具备更为优异的高温抗车辙性能;当纤维复合掺入时,沥青混凝土

动稳定度得到明显提升;试件C2G2、C1G3的动稳定度均达到3000次/mm以上;当CF/GF以质量比1:3复掺时,纤维复合改性沥青混凝土试件C1G3的动稳定度达到最高,分别为单掺CF及GF纤维试件的2.2、1.8倍.纤维复掺有利于发挥不同类型纤维特

性优势,玻璃纤维在高温下具有更为优异的力学性能,在沥青胶浆中可强化加筋网络结构,限制高温下沥青流动,提高沥青混凝土高温性能与抗车辙能力^[17].

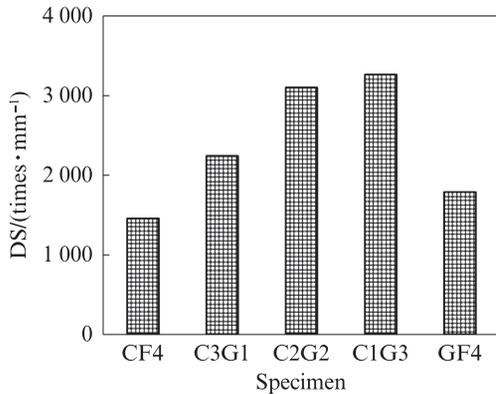


图2 CF/GF复合改性沥青混凝土的高温车辙试验动态稳定度结果

Fig. 2 Dynamic stability of CF/GF composite modified asphalt concretes in rutting test

2.3 水稳定性

2.3.1 浸水马歇尔试验

CF/GF复合改性沥青混凝土的浸水马歇尔试验结果(马歇尔稳定度及残留稳定度)如图3所示.由

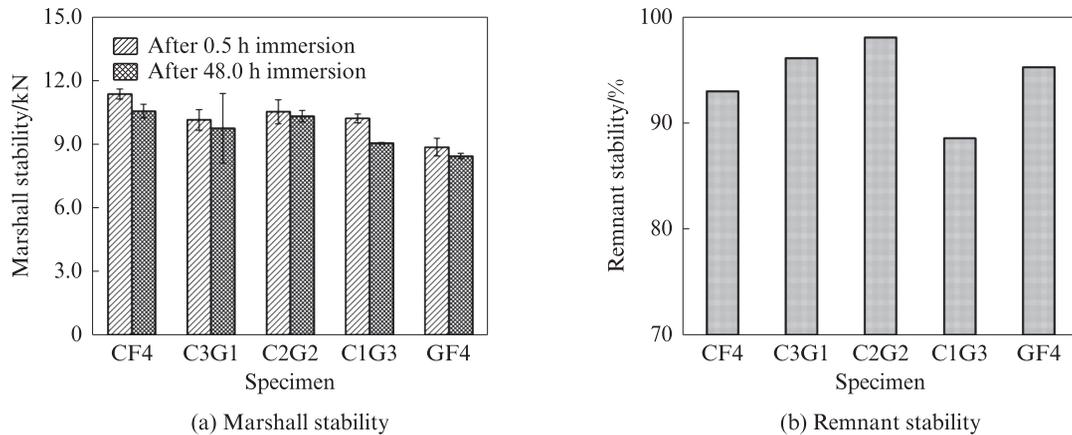


图3 CF/GF复合改性沥青混凝土的浸水马歇尔试验结果

Fig. 3 Marshall-immersion test results of CF/GF composite modified asphalt concretes

2.3.2 冻融劈裂试验

通过测定劈裂抗拉强度并计算冻融劈裂抗拉强度比TSR,可为不同配比的CF/GF复合改性沥青混凝土水稳定性提供进一步参考,试验结果如图4所示.由图4(a)可知:与单一纤维改性相比,冻融循环前后CF/GF复合改性试件的冻融劈裂强度均有不同程度提高;当CF/GF以质量比3:1复掺时,沥青混凝土的冻融劈裂强度得到大幅提升,分别为CF、GF单一改性试件的1.8、1.5倍.复合改性可发挥不同纤维

图3(a)可知,单一纤维改性时,CF改性试件马歇尔稳定度明显高于GF改性试件.与GF相比,CF具有较高的比表面积,从而可以更好地吸附基体结构中的自由沥青,并提高结构沥青比例.此外,与GF单一改性相比,纤维复掺改性使混合料马歇尔稳定度明显提升.试件浸水后马歇尔稳定度均发生下降,这是由于浸水过程对沥青胶浆与集料间的结合能力产生负面影响,破坏了基体内部结构.

由图3(b)可知,单一纤维改性时,试件GF4的残留稳定度高于试件CF4.这是因为GF非极性的表面具有更好的耐水性能,可以有效减少浸水后试件马歇尔稳定度的降低.与单一纤维改性相比,当CF/GF以质量比1:1复掺时,试件C2G2的残留稳定度最高,表明其具备良好的抗水损害能力.这归因于CF/GF复合后在沥青胶浆中彼此搭接,形成致密的纤维网络,并使其与集料间形成良好的浸润界面,提高了沥青胶浆的黏结力及集料表面沥青膜厚度,从而帮助混合料整体获得更好的水稳定性^[18-19].而当CF/GF以质量比1:3复掺时,试件C1G3的残留稳定度明显下降,这可能是由于丝状的玻璃纤维与木质素纤维发生团聚,影响了复合改性试件水稳定性的提升.

维的协同作用,两者优异的桥接性能可强化其在基体结构骨架内部的增韧作用,缓冲内部应力、降低基体渗透性,提高沥青混凝土水稳定性.

与冻融循环前试件强度相比,冻融循环后试件强度均有所降低,以冻融劈裂抗拉强度比TSR作为评价指标,由图4(b)可知:试件GF4的TSR高于试件CF4,这是由于CF的拉伸强度较低,且自身更倾向于聚集和吸收水分,抗水损害性能较弱;CF/GF复合改性试件TSR均高于CF单一纤维改性试件;

其中,试件C2G2具有最高的TSR值,达99.2%。玻璃纤维的极性表面可以提高基体的抗水损害能力,纤维复合网络结构与沥青形成巨大的浸润界面,增大了集料表面沥青膜厚度^[20],从而阻滞了水分在基

体内的迁移,提升了沥青混凝土的水稳定性。试件C1G3的TSR相较试件GF4有所降低,这可能是由于纤维团聚导致抗水损害性能下降,但仍优于CF单一改性组。

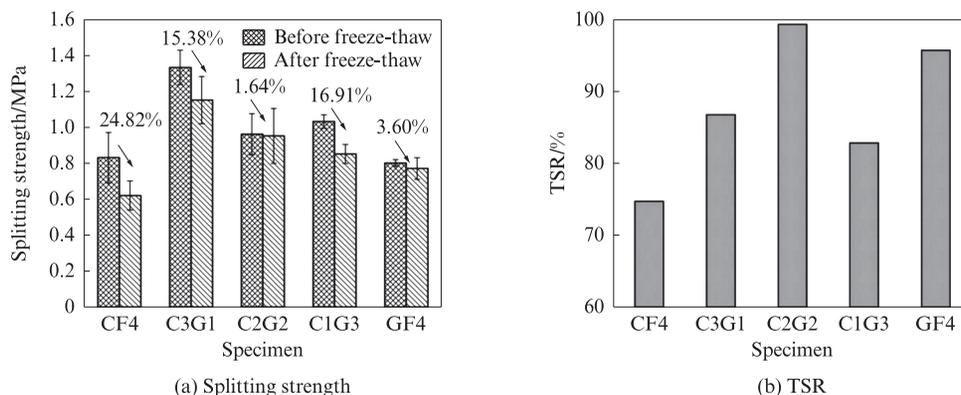


图4 CF/GF复合改性沥青混凝土的冻融劈裂试验结果

Fig. 4 Water stability results of CF/GF composite modified asphalt concretes in freeze-thaw splitting test

2.4 低温性能

通过弯曲试验探究纤维复合改性沥青混凝土的低温(-10℃)力学性能,试件修正跨中挠度 d 及最大荷载 P_B 计算结果如表4所示,弯拉强度及最大弯拉应变结果如图5所示。表4和图5表明:CF/GF复合改性沥青混凝土获得了较好的低温抗裂性;与CF单一改性相比,CF/GF复合改性沥青混凝土在低温破坏时梁底最大弯拉应变均得到提升,说明玻璃纤维的加入提高了混合料的低温柔性及抗变形能力;当CF/GF以质量比1:3复掺时,试件C1G3的弯拉强度较CF单一改性时提高了6.5%,最大弯拉应变提升了13.3%,这表明该配比下纤维复合改性沥青混凝土的低温抗拉、阻裂能力有所增强。复合改性过程中不同纤维相

表4 CF/GF复合改性沥青混凝土的修正跨中挠度及最大荷载
Table 4 Modified mid-span displacement and maximum load of CF/GF composite modified asphalt concretes

Specimen	d /mm	P_B /N
CF4	0.372	938
C3G1	0.370	706
C2G3	0.409	817
C1G3	0.420	1000
GF4	0.519	1005

互搭接,构建了更为致密的桥接纤维网络,并通过吸附作用增大结构胶结体黏度,在基体骨架中可以传递并缓冲应力,约束了基体内部裂纹的扩展,从而保证混合料具备较为优异的低温抗裂性^[21]。

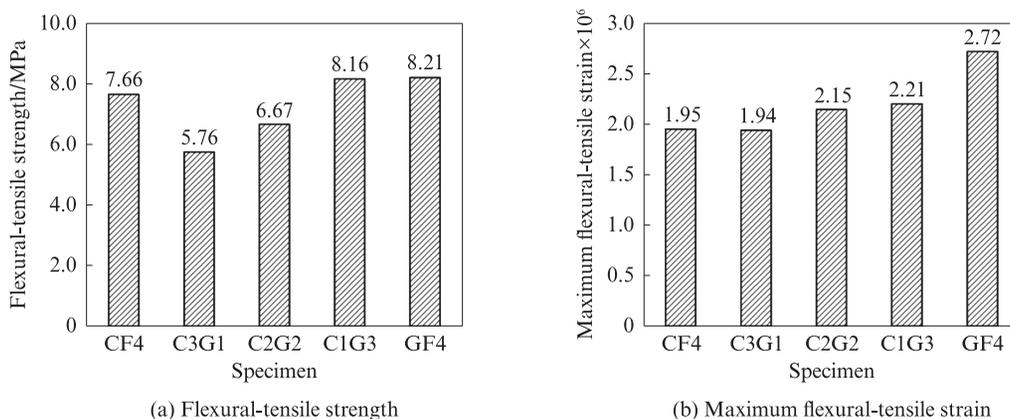


图5 CF/GF复合改性沥青混凝土的弯拉强度和最大弯拉应变

Fig. 5 Flexural-tensile strength and maximum flexural-tensile strain of CF/GF composite modified asphalt concretes

3 结论

(1)木质素纤维CF/玻璃纤维GF复合改性沥青

混凝土具备优异的高温性能和低温性能。与CF单一改性相比,当CF/GF以质量比1:3复掺时,沥青混凝土的车辙动稳定度及低温最大弯拉应变均得到提升,

在高温与低温环境下均具有较为优异的抗变形能力。

(2)CF/GF复合改性沥青混凝土具有较好的水稳定性.与GF单一改性相比,CF/GF复合改性提高了试件浸水前后的马歇尔稳定度,有效提升了沥青混凝土的水稳定性;同时还提升了沥青混凝土的冻融劈裂抗拉强度比,提高了其抗水损害能力。

(3)CF/GF复合改性通过不同纤维特性的结合,增大了沥青混凝土的压实程度,在沥青混凝土中起到吸附、加筋及阻裂的物理增强作用,从而使其获得更为致密和均匀的结构,克服了单一纤维改性在沥青混凝土综合性能提升方面的局限,并提高了其在温度变化、水损及应力作用下的稳定性,协同强化了沥青混凝土的路用性能提升效果。

参考文献:

- [1] 沙爱民,蒋玮,王文通,等.面向智慧道路建造的新型路面材料设计与展望[J].科学通报,2020,65(30):3259-3269.
SHA Aimin, JIANG Wei, WANG Wentong, et al. Design and prospect of new pavement materials for smart road[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(30):3259-3269. (in Chinese)
- [2] 黄晓明.路基路面工程[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019:2-9.
HUANG Xiaoming. Road subgrade and pavement engineering [M]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019:2-9. (in Chinese)
- [3] 谭忆秋,吕慧杰,徐慧宁.材料基因思想在沥青路面材料领域的应用展望[J].交通运输研究,2020,6(5):1-12.
TAN Yiqiu, LÜ Huijie, XU Huining. Application prospect of material genetics idea in asphalt pavement materials[J]. Transport Research, 2020, 6(5):1-12. (in Chinese)
- [4] 赵立东,万建军,郑广顺,等.高模量沥青胶结料路用性能流变学分析[J].建筑材料学报,2019,22(1):127-134.
ZHAO Lidong, WAN Jianjun, ZHENG Guangshun, et al. Rheological study of paving performance of high modulus asphalt binders[J]. Journal of Building Materials, 2019, 22(1):127-134. (in Chinese)
- [5] ABTAHI S M, SHEIKHZADEH M, HEJAZI S M. Fiber-reinforced asphalt-concrete - A review[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(6):871-877.
- [6] ZHANG J W, HUANG W D, ZHANG Y, et al. Evaluating four typical fibers used for OGFC mixture modification regarding drainage, raveling, rutting and fatigue resistance[J]. Construction and Building Materials, 2020, 253:119131.
- [7] 赵颖华,赵立东,范颖芳,等.聚酯纤维改性沥青混凝土的高温和水稳定性[J].建筑材料学报,2008,11(5):550-554.
ZHAO Yinghua, ZHAO Lidong, FAN Yingfang, et al. High temperature stability and water stability of asphalt mixture modified by polyester fiber[J]. Journal of Building Materials, 2008, 11(5):550-554. (in Chinese)
- [8] LUO D, KHATER A, YUE Y C, et al. The performance of asphalt mixtures modified with lignin fiber and glass fiber: A review[J]. Construction and Building Materials, 2019, 209:377-387.
- [9] AYSAR N A J D, 郑传超,郭进英.纤维加筋沥青混凝土断裂性能试验[J].长安大学学报(自然科学版),2005,25(3):28-32.
AYSAR N A J D, ZHENG Chuanchao, GUO Jinying. Experiments of fracture behavior of glass fiber reinforced asphalt concrete[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science), 2005, 25(3):28-32. (in Chinese)
- [10] MOREA F, ZERBINO R. Improvement of asphalt mixture performance with glass macro-fibers [J]. Construction and Building Materials, 2018, 164:113-120.
- [11] FAN W X, KANG H G, ZHENG Y X. Experimental study of pavement performance of basalt fiber-modified asphalt mixture[J]. Journal of Southeast University(English Edition), 2010, 26(4):614-617.
- [12] 韦佑坡,张争奇,司伟,等.玄武岩纤维在沥青混凝土中的作用机理[J].长安大学学报(自然科学版),2012,32(2):39-44.
WEI Youpo, ZHANG Zhengqi, SI Wei, et al. Performance promoting mechanism of asphalt mixture by basalt fiber[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science), 2012, 32(2):39-44. (in Chinese)
- [13] 李强,覃潇.玻璃纤维-硫酸钙晶须复合改性沥青混合料路用性能[J].广东公路交通,2021,47(4):75-78,89.
LI Qiang, QIN Xiao. Road performance of glass fiber-calcium sulfate whisker compound modified asphalt mixture [J]. Guangdong Highway Communications, 2021, 47(4):75-78,89. (in Chinese)
- [14] 孟续峰.SBS改性复合纤维沥青混凝土高温性能研究[J].公路交通科技(应用技术版),2015,11(6):162-164.
MENG Xufeng. Study on high temperature performance of SBS modified composite fiber asphalt mixture[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development (Application Technology Edition), 2015, 11(6):162-164. (in Chinese)
- [15] DAVAR A, TANZADEH J, FADAEI O. Experimental evaluation of the basalt fibers and diatomite powder compound on enhanced fatigue life and tensile strength of hot mix asphalt at low temperatures[J]. Construction and Building Materials, 2017, 153:238-246.
- [16] 伏伟俐.复掺纤维SMA-13沥青混凝土性能试验研究[D].扬州:扬州大学,2019.
FU Weili. Experimental study on properties of compound fiber SMA-13 asphalt mixture[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2019. (in Chinese)
- [17] 朱洪洲,谭祺琦,杨孝思,等.纤维改性沥青混凝土性能的研究现状与展望[J].科学技术与工程,2022,22(7):2573-2584.
ZHU Hongzhou, TAN Qiqi, YANG Xiaosi, et al. Research status and prospect of fiber modified asphalt mixture performance [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(7):2573-2584. (in Chinese)
- [18] 倪良松,陈华鑫,胡长顺,等.纤维沥青混凝土增强作用机理分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2003,26(5):

- 1033-1037.
NI Liangsong, CHEN Huaxin, HU Changshun, et al. Discussion on the reinforcement mechanism of fiber-reinforced asphalt mixture [J]. Journal of Hefei University of Technology(Natural Science), 2003, 26(5):1033-1037. (in Chinese)
- [19] 熊锐. 盐富集条件下矿物复合纤维沥青混凝土路用性能及腐蚀损伤研究[D]. 西安:长安大学, 2012.
XIONG Rui. Road performance and corrosion damage of mineral composite fiber asphalt mixture in salt enrichment condition[D]. Xi'an:Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [20] 吴金荣, 张涛, 李飞. 煤矸石粉/聚酯纤维沥青混凝土盐冻损伤研究[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(5):516-524.
WU Jinrong, ZHANG Tao, LI Fei. Salt-freezing damage performance of coal gangue powder/polyester fiber asphalt mixture [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(5):516-524. (in Chinese)
- [21] 李震南, 申爱琴, 郭寅川, 等. 玄武岩纤维沥青胶浆及混合料的低温性能关联性[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(1):146-152.
LI Zhennan, SHEN Aiqin, GUO Yinchuan, et al. Low temperature performance correlation of basalt fiber asphalt mortar and mixture[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(1):146-152. (in Chinese)

(上接第 1157 页)

- adsorption behavior of typical lithologic manufactured [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(3):251-258.(in Chinese)
- [14] 李家正, 龚德新, 林育强, 等. 人工砂MB值影响机制研究 [J]. 建筑材料学报, 2023, 26(1):71-77.
LI Jiazheng, GONG Dexin, LIN Yuqiang, et al. Study on influential mechanism of artificial sand MB value [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(1):71-77. (in Chinese)
- [15] SALAS D A, RAMIREZ A D, RODRÍGUEZ C R, et al. Environmental impacts, life cycle assessment and potential improvement measures for cement production: A literature review [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 113:114-122.
- [16] HEEDE P V D, BELIE N D. Environmental impact and life cycle assessment (LCA) of traditional and 'green' concretes: Literature review and theoretical calculations [J]. Cement and Concrete Composites, 2012, 34:431-442.
- [17] MARINKOVIĆ S, CAREVIĆ V, DRAGAŠ J. The role of service life in life cycle assessment of concrete structures [J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 290:125610.

(上接第 1182 页)

- on time-dependence of concrete exposed to chloride diffusion[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011, 43(2):279-282. (in Chinese)
- [20] 王爱国, 吕邦成, 刘开伟. 珊瑚骨料混凝土性能及微结构的研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(9):1528-1533.
WANG Aiguo, LIU Bangcheng, LIU Kaiwei. A review of properties and microstructure of coral aggregate concrete [J]. Materials Reports, 2018, 32(9):1528-1533. (in Chinese)
- [21] 高云, 吴凯, 穆松. 基于孔隙结构预测水泥基体的氯离子扩散系数[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(4):375-380.
GAO Yun, WU Kai, MU Song. A pore structure based prediction of chloride diffusivity for cement paste[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(4):375-380. (in Chinese)
- [22] ZHAO G W, LI J P, HAN F, et al. Sulfate-induced degradation of cast-in-situ concrete influenced by magnesium[J]. Construction and Building Materials, 2019, 199:194-206.
- [23] 於德美, 关博文, 申爱琴, 等. 非饱和混凝土氯离子传输模型及参数分析[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(4):1130-1135.
YU Demei, GUAN Bowen, SHEN Aiqin, et al. Chloride transport model and parameter analysis of unsaturated concrete [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, 36(4):1130-1135. (in Chinese)
- [24] LIN G, LIU Y H, XIANG Z H. Numerical modeling for predicting service life of reinforced concrete structures exposed to chloride environments [J]. Cement and Concrete Composites, 2010, 32(8):571-579.
- [25] BAZANT Z P, NAJJAR L J. Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete[J]. Materials & Structures, 1972, 5(1):3-20.
- [26] GERARD B, PIJAUDIER-CABOT G, LABORDERIE C. Coupled diffusion-damage modelling and the implications on failure due to strain localisation [J]. International Journal of Solid & Structures, 1998, 35(31/32):4107-4120.

(上接第 1199 页)

- concrete under carbonization and salt freezing [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(6):623-630. (in Chinese).
- [24] ZHAO G W, LI J P, SHI M, et al. Degradation mechanisms of cast-in-situ concrete subjected to internal external combined sulfate attack [J]. Construction and Building Materials, 2020, 248:118683.
- [25] COX D R, MILLER H D. The theory of stochastic processes [M]. London:Routledge, 2017:55-56.